

УДК 678.83

С.И. Войнов¹, Г.Ф. Железина¹, Н.А. Соловьева¹, Г.А. Ямицкова¹**ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ НА СВОЙСТВА ОРГАНОПЛАСТИКА, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ПРОПИТКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ (RTM)**

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-72-78

Исследовано влияние климатических факторов и эксплуатационных жидкостей на свойства органо-пластика ВКО-21, изготовленного методом пропитки под давлением. Показано, что органопластик ВКО-21 имеет высокий уровень сохранения свойств при воздействии факторов внешней среды (не менее 81% от исходного значения) и не уступает в этом отношении типовому конструкционному органо-пластику ВКО-19, изготовленному методом автоклавного формования.

Ключевые слова: органопластик, арамидные волокна, пропитка под давлением, полимерные композиты.

An influence of climatic factors and working fluids on properties of VKO-21 AFRP (aramid fiber reinforced plastic) manufactured by RTM (resin transfer moulding) technology was investigated. It was shown that the VKO-21 AFRP has a high level of properties conservation under the influence of environmental factors (at least 81% of the initial value) and in this regard is not inferior to the conventional structural VKO-19 AFRP manufactured by autoclave molding.

Keywords: AFRP, aramid fiber, RTM, polymer composites.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Развитие авиационной техники невозможно без совершенствования и внедрения новых материалов и технологий их производства. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) прочно завоевали место среди конструкционных материалов в авиационной промышленности [1]. Их применение взамен металлических сплавов обеспечивает снижение массы конструкций, повышение ресурса эксплуатации, снижение трудоемкости изготовления и материалоемкости. Снижение массы авиационных конструкций благодаря применению новых материалов дает возможность снизить потребление топлива, увеличить полезную нагрузку (количество пассажиров и полезного груза) [2–4].

Опыт эксплуатации органопластиков в составе авиационных конструкций показывает, что эти материалы имеют достаточно высокую эксплуатационную надежность в различных климатических зонах – календарный срок эксплуатации составляет не менее 10–15 лет. Однако в сравнении с композитами на основе стекляных и углеродных волокон органопластики на основе арамидного волокна в большей степени сорбируют атмосферную влагу. Несмотря на то что по уровню сохранения конструкционных свойств при влагонасыщении органопластики не уступают угле- и стеклопластикам, повышенное водопоглощение традиционно считается основным недостатком этих материалов [5, 6].

Один из путей повышения влагостойкости органопластиков – это использование безрастворных связующих для их изготовления. Необходимость применения безрастворных связующих обусловлена тем, что органопластики, изготавливаемые по типовой растворной технологии (Органит 12Т, Органит 16Т/Рус и др.), имеют повышенную пористость из-за невозможности полного удаления растворителя. Использование безрастворного связующего при изготовлении органопластика ВКО-19 позволило обеспечить герметичность и минимальную пористость органопластика. Применение экологически безопасной (безрастворной) технологии отвечает современным требованиям охраны окружающей среды [7, 8].

В настоящее время в мире активно ведут исследования, направленные на разработку материалов и технологий, позволяющих отказаться от применения растворителей и снизить затраты при изготовлении изделий из ПКМ [9]. Это связано с тем, что для изготовления высоконагруженных авиационных конструкций из ПКМ используют преимущественно метод автоклавного формования. Недостатками ПКМ, изготовленных методом автоклавного формования, являются: необходимость предварительного изготовления препрегов, что требует дополнительных трудо- и энергозатрат и снижает экологическую безопасность производства; невозможность изготовления деталей с высоким качеством внешней и внутренней поверхности.

Метод пропитки под давлением (RTM) как альтернатива методу автоклавного формования обеспечивает изготовление деталей с высоким качеством поверхности как с внешней, так и с внутренней стороны. Используемая для технологии RTM форма позволяет изготовить детали с высокой точностью по геометрической форме и толщине. За рубежом для изготовления ПКМ широко применяют технологию RTM, которая позволяет изготавливать детали сложной формы за одну технологическую операцию без предварительного изготовления препрега. Использование метода пропитки под давлением (RTM) позволяет автоматизировать производство, улучшить условия труда и повысить качество продукции [10–13].

При использовании RTM-технологии жидкая смола (связующее) помещается в закрытую оснастку (пресс-форму), в которой находится сухой пакет армирующего волокнистого наполнителя (рис.1). Отверждение связующего происходит в форме при повышенной температуре, после чего готовая деталь извлекается. Оборудование для этой технологии относительно недорого, поскольку не используется дорогостоящий автоклав. Связующее, которое может перерабатываться методом пропитки под давлением, должно отвечать определенным требованиям, таким как низкая вязкость для пропитки пакета наполнителя и необходимая жизнеспособность при температуре пропитки пакета наполнителя [14–16].

При выборе технологических параметров изготовления деталей методом RTM важно обеспечить равномерное распределение связующего в объеме армирующего наполнителя, исключить возможность образования пустот и непропитанных участков, поскольку любое нарушение монолитности композиционного материала может привести к снижению его работоспособности в условиях воздействия факторов внешней среды в процессе хранения и эксплуатации [18–20].

Целью данной работы является исследование стабильности свойств органопластика, полученного методом пропитки под давлением, при воздействии факторов внешней среды (температуры и повышенной влажности) и эксплуатационных жидкостей (топлива, масла).

Материалы и методы

Объектом исследования является изготовленный методом RTM конструкционный органопластик ВКО-21 на основе равнопрочной арамидной ткани российского производства с поверхностной плотностью $90 \pm 4 \text{ г/м}^2$, используемой в составе конструкционных органопластиков авиационного назначения. Выбранная ткань, изготовленная из арамидных нитей Русар, имеет равнопрочную атласную структуру, что позволяет осуществлять ее выкладку на поверхностях двойной кривизны при формовании изделий сложной формы. Нити Русар по сравнению с арамидными нитями перво-

го поколения СВМ обладают улучшенными на 20–30% механическими свойствами и более устойчивы к поглощению влаги. В качестве связующего в составе органопластика ВКО-21 используется модифицированное эпоксидное связующее марки ВСЭ-17. Физико-механические характеристики органопластика ВКО-21 представлены в табл. 1, на рис. 2 показан внешний вид образца из органопластика ВКО-21.

Органопластик ВКО-21 предназначен для эксплуатации при температуре от -60 до $+150^\circ\text{C}$. Уровень сохранения свойств органопластика ВКО-21 при максимальной рабочей температуре 150°C составляет: 91% – предел прочности при растяжении, 64% – предел прочности при сжатии, 69% – предел прочности при изгибе.

Равнопрочная арамидная ткань, использованная для армирования органопластика ВКО-21, наиболее пригодна для изготовления деталей методом RTM. При ее применении в качестве армирующего наполнителя значительно упрощается процесс сборки и пропитки пакетов для деталей сложной формы, чем при использовании однонаправленных арамидных армирующих наполнителей. Связующее ВСЭ-17, разработанное во ФГУП «ВИАМ» применительно к технологии RTM, имеет необходимые для RTM технологические характеристики: вязкость связующего при нагреве до 95°C (температура переработки) составляет $<0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (рис. 3, а) и жизнеспособность связующего при этой температуре составляет 135 мин (рис. 3, б), что достаточно для проведения процесса пропитки под давлением.

Образцы органопластика ВКО-21 для проведения исследований изготавливали на оборудовании фирмы Magnum Venus Plastech Ltd.

При эксплуатации и хранении изделия из ПКМ подвергаются воздействию температуры и влажности окружающего воздуха. В зависимости от конкретного применения изделия из ПКМ подвергаются либо длительному и непрерывному воздействию температуры и влажности окружающего воздуха, либо кратковременным воздействиям этих факторов. Значения температуры и влажности зависят от климатической зоны и ряда других факторов, непосредственно связанных с назначением изделия, и, следовательно, с условиями эксплуатации. О стойкости ПКМ к совместному или последовательному действию температуры и влажности можно судить по изменению их эксплуатационных свойств. Испытания на стойкость полимерных материалов или изделий из них к действию температуры и влаги, которое может быть весьма разнообразным как по интенсивности, так и по продолжительности, проводятся в специальных автоматических тепловлажностных камерах [14–17].

Исследование влияния внешней среды (температуры, влажности) и эксплуатационных жидкостей на свойства органопластика ВКО-21 проводили в указанных далее условиях.

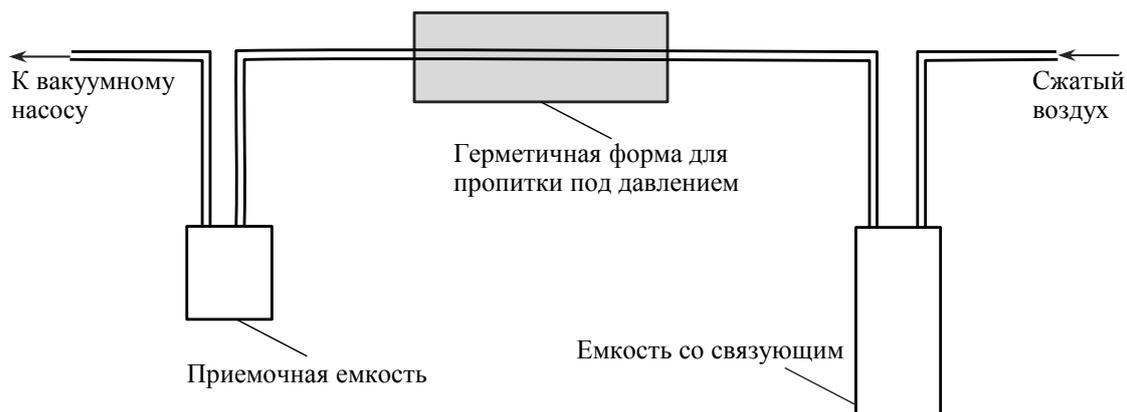


Рис. 1. Схема пропитки под давлением (RTM)

Таблица 1

Свойства конструкционного органопластика ВКО-21, изготовленного методом пропитки под давлением

Характеристики	Направление приложения нагрузки, град	Значения характеристик при температуре, °С	
		20	150
Предел прочности при растяжении, МПа	0	810	740
	90	640	570
Модуль упругости при растяжении, ГПа	0	35	29
	90	31	27
Коэффициент Пуассона	0	0,07	–
	90	0,07	–
	45	0,81	–
Предел прочности при сжатии, МПа	0	220	140
	90	220	150
Модуль упругости при сжатии, ГПа	0	24	–
	90	24	–
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	0	30	28
	90	33	29
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	0	550	380
	90	540	370
Модуль упругости при изгибе, ГПа	0	22	16
	90	23	19
Ударная вязкость, кДж/м ²	0	195	–
	90	189	–
Плотность, кг/м ³	–	1290–1330	
Температура стеклования, °С	–	198	
Категория горючести	–	Самозатухающий	
Категория дымообразования	–	Сильнодымящий	



Рис. 2. Внешний вид органопластика ВКО-21

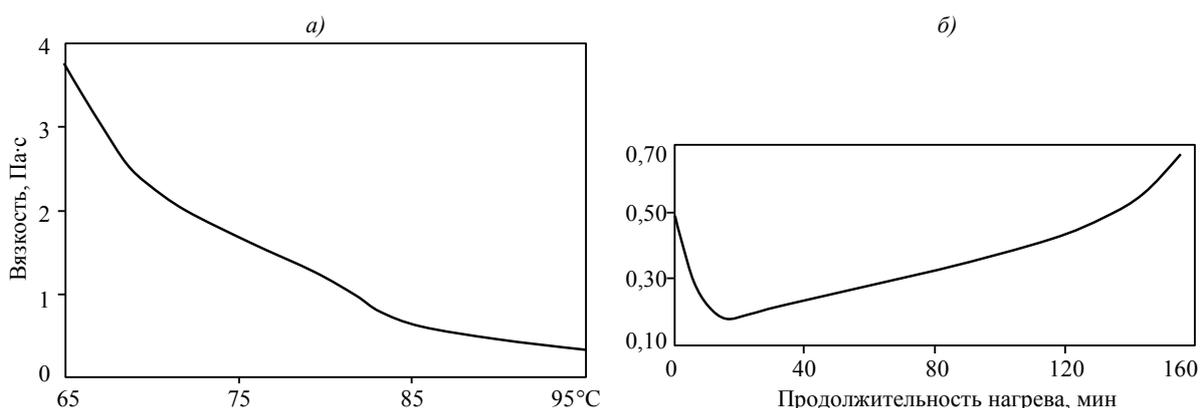


Рис. 3. Зависимость вязкости связующего ВСЭ-17 от температуры (а) и продолжительности нагрева при температуре 95°C (б)

Таблица 2

Испытание органопластика ВКО-21 после экспозиции в камере тепловлажного старения при температуре 60°C и относительной влажности 85%

Продолжительность экспозиции, сут	Предел прочности при изгибе, МПа, при температуре, °C	
	20	150
Без экспозиции	580	370
30	560	340
60	550	330
90	500	300

Таблица 3

Испытание органопластика ВКО-21 после экспозиции в камере тропического климата

Продолжительность экспозиции, сут	Предел прочности при изгибе, МПа, при температуре, °C	
	20	150
Без экспозиции	580	370
30	550	330
60	520	320
90	530	330

Таблица 4

Тепловое старение органопластика ВКО-21 при максимальной рабочей температуре 150°C

Продолжительность экспозиции, ч	Предел прочности при изгибе, МПа, при температуре, °C	
	20	150
Без экспозиции	540	370
500	520	360
1000	510	340
2000	480	320

Таблица 5

Влаго- и водостойкость образцов органопластика ВКО-21

Условия экспозиции	Предел прочности при изгибе, МПа, при температуре, °C		Привес, %
	20	150	
Без экспозиции	530	360	–
При φ=98% и 20°C в течение 90 сут	510	310	1,7
В воде при 20°C в течение 90 сут	530	320	1,8

Таблица 6

Топливо- и маслостойкость образцов органопластика ВКО-21

Условия экспозиции	Предел прочности при изгибе, МПа, при температуре, °C		Привес, %
	20	150	
Без экспозиции	530	360	–
В топливе ТС-1 при 20°C в течение 30 сут	490	350	0,11
В масле ИПМ-10 при 20°C в течение 30 сут	480	340	0,12

Тепловое старение проводили в воздушном термостате при температуре 150°C. Максимальное отклонение температуры от заданной для термостата не превышало $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Ускоренное тепловлажностное старение органопластика исследовали в соответствии с ГОСТ 9.707–81 при температуре 60°C и относительной влажности 85%. Испытания проводили в камере тепловлажностного старения «Climats» (Франция) с автоматическим поддержанием заданного режима испытаний; погрешность поддержания температуры составляла $\pm 2^\circ\text{C}$, погрешность измерения влажности $\pm 3\%$. После экспозиции в камере определяли прочность органопластика при изгибе.

Климатическое старение органопластика проводили в камере тропического климата, позволяющей создать следующий циклический режим испытаний: 8 ч при $50 \pm 5^\circ\text{C}$ и $\phi = 100\% + 12$ ч при $20 \pm 5^\circ\text{C}$ и $\phi = 100\% + 8$ ч при $20 \pm 5^\circ\text{C}$ и $\phi = 65\%$. Данный режим имитирует тепловлажностное воздействие, характерное для тропического климата. После экспозиции в камере определяли прочность при изгибе.

Влагостойкость образцов органопластика исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре и влажности 98%. Определяли изменение предела прочности органопластика при изгибе и привес образца в результате поглощения влаги в соответствии с ГОСТ 4650–80.

Водостойкость образцов органопластика исследовали после выдержки в течение 90 сут при комнатной температуре в воде. Определяли изменение предела прочности органопластика при изгибе и привес образца в результате поглощения воды в соответствии с ГОСТ 4650–80.

Топливостойкость образцов органопластика исследовали после выдержки в течение 30 сут при комнатной температуре в топливе марки ТС-1. Определяли изменение предела прочности при изгибе и привес образца в результате сорбции топлива, испытания проводили в соответствии с ГОСТ 12020–72.

Маслостойкость образцов органопластика исследовали после выдержки в течение 30 сут при комнатной температуре в масле ИПМ-10. Определяли изменение предела прочности при изгибе и привес образца в результате сорбции, испытания проводили в соответствии с ГОСТ 12020–72.

Механические испытания органопластиков проводили на испытательных машинах Тиратест-2200 и RKM-50 в соответствии с ГОСТ 25.604–82 (предел прочности при изгибе).

Результаты

В табл. 2 представлены результаты испытаний органопластика ВКО-21 после экспозиции в камере тепловлажностного старения при температуре 60°C и относительной влажности 85%. Установлено, что после экспозиции в этих условиях в те-

чение 90 сут уровень сохранения прочности органопластика ВКО-21 при изгибе составляет 86% – при 20°C и 81% – при испытании при рабочей температуре 150°C в сравнении с исходными значениями при указанных температурах.

В табл. 3 представлены результаты испытаний органопластика ВКО-21 после экспозиции в камере тропического климата. Установлено, что после экспозиции в этих условиях в течение 90 сут уровень сохранения прочности органопластика ВКО-21 при изгибе составляет 91% – при 20°C и 89% – при испытании при рабочей температуре 150°C в сравнении с исходными значениями при указанных температурах.

Результаты испытаний органопластика ВКО-21 после теплового старения при 150°C представлены в табл. 4. Установлено, что после теплового старения в течение 2000 ч уровень сохранения предела прочности при изгибе органопластика ВКО-21 составляет 89% – при 20°C и 86% – при 150°C в сравнении с исходными значениями при этих температурах.

В табл. 5 представлены результаты исследования влаго- и водостойкости органопластика ВКО-21. После выдержки образцов органопластика с незащищенными торцами в воде и в среде с повышенной влажностью (98%) уровень сохранения прочности при изгибе составляет не менее 96% (при 20°C) и не менее 86% (при 150°C). Количество поглощенной органопластиком влаги не превышает 1,8% от исходной массы образца.

В табл. 6 представлены результаты исследования топливо- и маслостойкости органопластика ВКО-21. После выдержки образцов органопластика с незащищенными торцами в топливе ТС-1 и в масле ИПМ-10 уровень сохранения прочности при изгибе составляет не менее 91% (при 20°C) и не менее 94% (при 150°C). Привес образцов органопластиков при выдержке их в эксплуатационных жидкостях не превышает 0,12% от исходной массы образцов.

Обобщенные результаты проведенных исследований по влиянию внешней среды и эксплуатационных жидкостей на свойства органопластика ВКО-21, изготовленного методом пропитки под давлением, представлены в табл. 7 в сравнении с типовым конструкционным органопластиком ВКО-19, полученным по технологии автоклавного формования. Анализ полученных данных показывает, что органопластик ВКО-21, изготовленный методом RTM, не уступает органопластику ВКО-19 по уровню сохранения свойств после воздействия факторов внешней среды. Это свидетельствует о том, что использование метода пропитки под давлением позволяет изготавливать полимерные композиционные материалы с монолитной структурой, в которой отсутствуют поры, внутренние локальные микропустоты и непропитанные участки. Органопластик ВКО-21, изготовленный методом пропитки под давлением, не

Таблица 7

Сравнение характеристик органоластика ВКО-21, изготовленного методом RTM, и органоластика ВКО-19, изготовленного методом автоклавного формования

Характеристики	Значения характеристик органоластика	
	ВКО-21	ВКО-19
Предел прочности при растяжении, МПа	810	820
Модуль упругости при растяжении, ГПа	35	34
Предел прочности при сжатии, МПа	220	195
Модуль упругости при сжатии, ГПа	24	–
Предел прочности при статическом изгибе, МПа	550	505
Модуль упругости при изгибе, ГПа	22	28
Ударная вязкость, кДж/м ²	195	190
Влагопоглощение при φ=98% и 90 сут, %	1,7	1,12
Сохранение прочности при изгибе после выдержки при φ=98% и 90 сут, %	96	–
Водопоглощение после выдержки в воде 90 сут, %	1,8	1,5
Сохранение прочности при изгибе, %, после выдержки:		
– в воде 90 сут	100	–
– при рабочей температуре в течение 2000 ч	89	100
Привес после выдержки в топливе 30 сут, %	0,11	0,07
Сохранение прочности при сжатии после выдержки в топливе 30 сут, %	90	100
Привес после выдержки в масле 30 сут, %	0,12	0,13
Сохранение прочности при сжатии после выдержки в масле 30 сут, %	91	100
Сохранение прочности при изгибе, %		
– после выдержки в камере тропического климата 3 мес	91	100
– после экспозиции в камере тепловлажностного старения 2 мес	95	100

уступает по стойкости к воздействию факторов внешней среды органоластикам, изготовленным типовыми методами формования.

Обсуждение и заключения

Проведены исследования по влиянию факторов внешней среды (температуры, влажности) и эксплуатационных жидкостей на стабильность свойств органоластика ВКО-21, изготовленного методом пропитки под давлением. Установлено, что уровень сохранения свойств органоластика ВКО-21 при тепловлажностном и ускоренном климатическом старении составляет не менее 81%, при воздействии эксплуатационных жидкостей – не менее 91% (при испытаниях при комнат-

ной и максимальной рабочей температуре 150°C). По устойчивости к воздействию факторов внешней среды органоластик ВКО-21, изготовленный методом пропитки под давлением, не уступает типовому конструкционному органоластiku ВКО-19, изготовленному методом автоклавного формования.

Правильный выбор режимов изготовления при использовании метода пропитки под давлением позволяет получать органоластик с монолитной структурой, в которой отсутствуют поры, внутренние локальные микропустоты и непропитанные участки, и обеспечивает уровень свойств материалов не ниже, чем у органоластиков, полученных методом автоклавного формования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
3. Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов //Конверсия в машиностроении. 2004. №4 (65). С. 65–69.
4. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники //Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
5. Железина Г.Ф. Конструкционные и функциональные органоластики нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
6. Железина Г.Ф. Особенности разрушения органоластиков при ударных воздействиях //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 272–277.
7. Шульдешова П.М., Железина Г.Ф. Влияние атмосферных условий и запыленности среды на свойства конструкционных органоластиков //Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 64–68.

8. Железина Г.Ф., Шульдешова П.М. Конструкционные органопластики на основе пленочных клеев //Клеи. Герметики. Технологии. 2014. №2. С. 9–14.
9. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Технология изготовления ПКМ способом пропитки пленочным связующим //Клеи. Герметики. Технологии. №6. 2011. С. 25–29.
10. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Полимерные композиционные материалы, полученные путем пропитки пленочным связующим //Все материалы. Энциклопедический справочник. Композиционные материалы. 2011. №11. С. 2–6.
11. Чурсова Л.В., Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Особенности технологии изготовления деталей из композиционных материалов методом пропитки под давлением /В сб. тезисов докладов межотраслевой науч.-тех. конф. «Композиционные материалы в авиакосмическом материаловедении». М.: ВИАМ. 2009. С. 17.
12. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
13. Тимошков П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
14. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
15. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
16. Бабин А.Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения //Труды ВИАМ. 2013. №4 (viam-works.ru).
17. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях //Авиационные материалы и технологии. 2013. №S2. С. 68–73.
18. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения //Деформация и разрушение материалов. 2011. №1. С. 34–40.
19. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения //Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19–27.
20. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 412–423.